

HORMIGONES ALCALINOS EXENTOS DE CEMENTO PORTLAND

ALKALINE CONCRETES FREE OF PORTLAND CEMENT

Por / By Ana María Fernández-Jiménez, Angel Palomo, Cecilio López

Resumen

Actualmente el hormigón con cemento Portland es el material de construcción por excelencia. Sus propiedades mecánico-resistentes, su buena relación calidad/precio, sus prestaciones, en general, han contribuido a ello. No obstante, el proceso de fabricación del cemento Portland conlleva ciertos problemas energéticos (se necesitan alcanzar temperaturas superiores a 1400-1500°C) y medioambientales (la obtención de materias primas ocasiona la destrucción de canteras naturales y la fabricación del clínker da lugar a la emisión de diferentes gases CO_2 , NO_x , etc. – a la atmósfera) de los que la sociedad se está haciendo eco cada vez con más intensidad. Por otro lado, el hormigón tradicional presenta conocidos problemas de durabilidad, en estos tiempos difíciles de resolver. En el presente trabajo se presentan algunos de los resultados obtenidos en una investigación actualmente en marcha, en la cual se están elaborando hormigones con cementos alcalinos, en los que el cemento Portland se sustituye al 100% por ceniza volante y el agua de amasado por una disolución alcalina. Estos nuevos hormigones pueden alcanzar valores de resistencia mecánica a compresión del orden de 50 - 60 MPa a las 20 horas de su amasado. Son materiales con una gran estabilidad de volumen (apenas sufren retracción), y se espera de ellos una buena durabilidad, dada su similitud composicional con las zeolitas naturales, (resistencia al ataque por sulfatos, a la carbonatación, a la reacción álido-álcali, a la corrosión de las armaduras, etc.). Su precio, finalmente, es competitivo con el hormigón del cemento Portland y su aplicación en la industria de los prefabricados se promete inmediata y muy eficaz.

Palabras clave: Hormigón, activación alcalina, ceniza volante

Abstract

Nowadays Portland cement concrete is the most widely used building material. Its mechanical properties, the quality/price ratio, performance in general, have contributed to the success of this material along 20th century. However the process of fabrication of Portland cement involves some problems (energetically and environmentally speaking) affecting the general opinion of modern societies on the potential risks of such a process of fabrication: Very high temperatures need to be reached (1400°C – 1500°C); natural quarries are destroyed during the extraction of raw materials; CO_2 and NO_x are emitted to the atmosphere. Finally, traditional concrete also presents some durability problems, which are currently difficult to overcome. This paper offers some results obtained in an ongoing investigation. The investigation is related with the elaboration of alkaline concrete: concrete in which the Portland cement is completely replaced (100%) by fly ash and the mixing water by an alkaline dissolution. This new alkaline concrete may reach a compressive strength of 50 -60 MPa at 20 hours after the mixing. Additionally, alkaline concrete has a very good dimensional stability (it hardly undergoes shrinkage). Also, the adherence between the matrix and the steel reinforcement is very good; and because of the very similar chemical and mineral composition of alkaline cements with natural zeolites, it is expected that the new concrete will have very good durability properties. Finally the price of the new concrete is competitive with Portland cement concrete prices and the application of the new material in the precast industry could be done with almost no problems.

Keywords: Concrete, alkali activation, fly ash

1. FABRICACION DEL CEMENTO PORTLAND Y SU IMPACTO EN EL MEDIO-AMBIENTE

La fabricación de cemento no puede hoy día calificarse como una actividad extremadamente contaminante si se compara con otras que se llevan a cabo por el hombre, pero lo cierto es que fabricar cemento contribuye a deteriorar el medioambiente.

Dicha contribución se manifiesta fundamentalmente a través de la gran cantidad de energía que se consume para fabricar el clínker, y las emisiones de CO_2 a la atmósfera (también se emite NO_x y CH_4) pero en cantidades relativamente pequeñas).

En el consumo energético hay que destacar que la industria del cemento portland ocupa el tercer lugar del "ranking" sectorial (después de las industrias del aluminio y del acero) en gasto de energía. La fabricación de una tonelada de cemento necesita hoy día aproximadamente, 4 GJ de energía (Blanco-Varela et al., 1995), si bien es cierto que en el último cuarto del pasado siglo y gracias a un rápido desarrollo tecnológico se han reducido notablemente los requerimientos energéticos de la fabricación del cemento portland, no es menos cierto que los niveles que se han alcanzado serán muy difíciles de rebajar en el futuro para continuar reduciendo el consumo energético.

Respecto de la emisión de gases a la atmósfera (gases que contribuyen a estimular el denominado efecto invernadero), se



puede decir que la producción de una tonelada de cemento genera aproximadamente una tonelada de CO₂. (Davidovits, 1994). Datos recientes de la IEA (International Energy Authority, 1998) atribuyen a la industria cementera entre el 6% y el 7% del total de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Si el crecimiento de la producción mundial de cemento mantiene los ritmos previstos, se estima que en el primer cuarto del siglo XXI, hacia el año 2025, las emisiones de CO₂ a la atmósfera procedentes de la industria cementera podrían alcanzar los 3500 millones de toneladas/año, que es más o menos la cantidad total que se emite hoy día en Europa (incluyendo transporte, industria de la energía, etc.) (Cembureau, 2002).

Naturalmente la comunidad internacional ya empezó hace tiempo a estudiar la forma de abordar estos problemas. En las "cumbres" internacionales sobre medioambiente celebradas en Río de Janeiro (1992) y Kioto (1997), se establecieron las primeras pautas a seguir en términos de reducción de emisiones gaseosas a la atmósfera. Los compromisos alcanzados incluían rebajar las emisiones globales de CO₂ en un 5%, para los años 2006 – 2010 (respecto de los niveles de emisión de 1990), pero los problemas surgidos con posterioridad para cumplir los acuerdos ponen de relieve las dificultades existentes para mantener los equilibrios deseables en torno al medioambiente.

Como conclusión fundamental de todo lo expuesto parece desprenderse la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías, nuevos procesos, nuevos materiales, que permitan ofertar nuevas alternativas a la industria de la construcción.

2. ACTIVACION ALCALINA DE CENIZAS VOLANTES

La activación alcalina de materiales es un proceso químico que permite la transformación de determinados productos, parcial o totalmente amorfos y/o metaestables, en compactos esqueletos cementantes (Tailing et al., 1989; Glukhovskiy et al., 1980; Palomo y Glasser, 1992; Palomo et al., 1999; Puertas et al., 2002; Wang y Scrivener, 1995).

El primer aspecto a destacar sobre este genérico proceso químico es su diversidad cinética y también su variabilidad de desarrollo microestructural. En realidad, se puede hablar de dos grandes procesos de activación alcalina que obedecen a diferentes condiciones en la situación de partida.

Como ejemplo conocido del primero de los modelos, es necesario citar el que representa la activación de las escorias de alto horno en condiciones de alcalinidad relativamente suaves (Wang y Scrivener, 1995; Malek y Roy, 1995; Byfores, 1989; Teoreanu 1991; Fernández-Jiménez y Puertas, 1997; Kutti 1992).

El segundo gran modelo de activación alcalina ha sido mucho menos explorado a pesar de que ya en la década de los 60 se publicaron los primeros trabajos de investigación relativos a este proceso (Glukhovskiy, 1965). Como ejemplo típico a mostrar de este segundo proceso, que apunta a condiciones de alcalinidad elevadas, serían las cenizas volantes (Palomo et al., 1999 y 2003; Van Deventer y Hua Xu, 2000; Zhaohui y Yunping, 2001; Fernández-Jiménez et al., 2003; Silverstrim y Martin, 1999).

Las cenizas volantes hoy en día se han convertido en una materia prima básica de la industria de la construcción; con cenizas volantes se fabrican actualmente distintos tipos de cementos, hormigones, ladrillos, etc. Sin embargo, este subproducto industrial posee una potencialidad tal para su uso en la industria de la construcción, que en estos momentos se puede afirmar que se está desaprovechando considerablemente un recurso importante, en primer lugar, porque su volumen de producción es extraordinariamente alto (en el año 2000 se sobrepasaron los 600 millones de toneladas producidas en el mundo, lo que garantizaría elevados volúmenes de suministro) (Cembureau, 2002); además es un subproducto industrial (y por lo tanto barato); finalmente se presenta en un estado pulverulento que hace innecesario cualquier tipo de transformación previa a su uso como material cementante.

Davidovits (1991), se refirió al proceso de activación alcalina de materiales silicoaluminosos (con composiciones del tipo de la de las cenizas volantes) en términos de un modelo polimérico, similar a los esquemas propuestos para describir las reacciones de formación de determinadas ceolitas y precursores ceolíticos, en donde Al y Si, inicialmente en disolución, reaccionan entre sí para formar poli-hidroxi-silicoaluminatos complejos.

Es de especial relevancia la posible aplicación de la nueva tecnología al caso concreto de la industria de los prefabricados, debido fundamentalmente a que las cenizas volantes, en su proceso de activación, desarrollan una excelente progresión mecánica en el tiempo, cuando se someten a un curado térmico suave (entre 60°C y 90°C). (Fernández-Jiménez et al, 2003) En este sentido hay que destacar que:

- Muchos de los elementos prefabricados de hormigón, hoy día, se fabrican en condiciones de curado térmicamente acelerado.
- El volumen de piezas prefabricadas de hormigón manufacturadas en muchos países alcanza unos niveles que son compatibles con el volumen de cenizas volantes que se genera en dichos países (Fernández-Jiménez et al, 2002).

Mucho es el trabajo desarrollado en el Instituto Eduardo Torroja del CSIC a lo largo de los últimos años para profundizar en el conocimiento de la activación alcalina de diferentes materiales (escorias de alto horno, metacaolín y cenizas volantes, fundamentalmente). A continuación se dan a conocer algunos datos de interés obtenidos por los autores del presente trabajo sobre este nuevo conglomerante que es la ceniza volante activada.

3. CARACTERIZACION Y PROPIEDADES DE LAS MATRICES ALCALINAS

En el presente trabajo se hace una comparación entre morteros/hormigones de cemento portland y morteros/hormigones de ceniza volante activada en base a un conjunto de propiedades químicas, mineralógicas, microscópicas, físicas y mecánicas, etc., de los mismos.

3.1 Caracterización Química y Microestructural de las Materias Primas y de los Productos de Reacción

En la Tabla 1 se presenta la composición química de dos cementos comerciales tipo I fabricados en España y de dos cenizas volantes procedentes también de sendas centrales térmicas españolas. Los datos de la tabla muestran claramente que la ceniza volante está formada básicamente por sílice y alúmina, mientras que en los cementos portland los componentes esenciales son la cal y la sílice.

Tabla 1. Composición química de los cementos y de las cenizas volantes usados en la presente investigación

	C.V. L	C.V.C	Cem. 42.5	Cem. 52.5
*PF	1.80	3.59	3.48	1.48
**RI	0.40	0.32	1.65	0.55
SiO ₂	51.51	53.09	18.4	19.92
Al ₂ O ₃	27.47	24.80	5.96	6.44
Fe ₂ O ₃	7.23	8.01	2.17	1.16
CaO	4.39	2.44	62.83	63.28
MgO	1.86	1.94	1.43	0.63
SO ₃	0.15	0.23	3.50	1.09
K ₂ O	3.46	3.78	0.54	-
Na ₂ O	0.70	0.73	0.2	-
Total	99.01	99	100.16	100

*PF= pérdida al fuego; **RI= Residuo insoluble

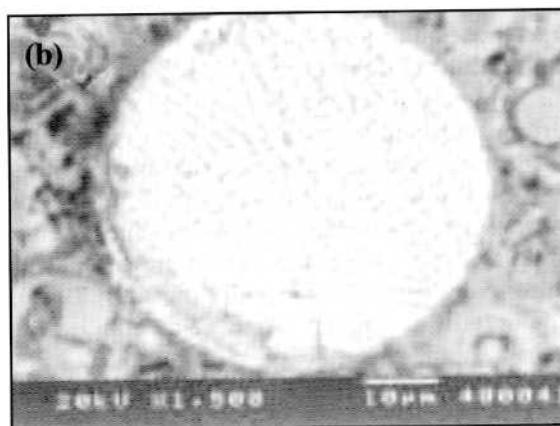
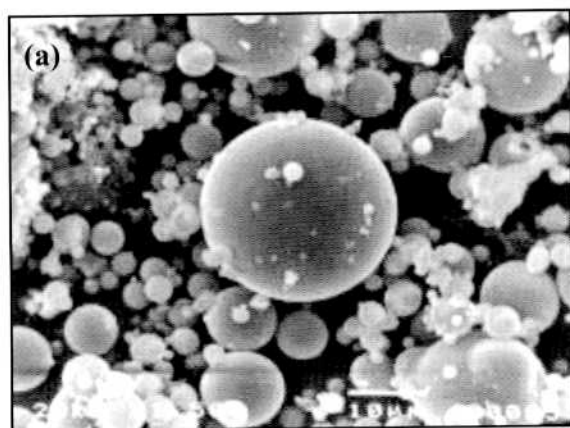


Figura 1. Imágenes de MEB (a) ceniza volante y (b) detalle de una partícula de ceniza con crecimientos dendríticos de minerales de hierro

3.1.1 Procesos de Reacción

El proceso de activación de las cenizas volantes es un proceso muy diferente al de la hidratación del cemento portland. En la Figura 2 se presenta un esquema de ambos procesos reactivos. La Figura 2(a) muestra de forma esquemática el proceso de hidratación del cemento portland, en el cual se obtiene como producto mayoritario y responsable de las propiedades aglomerantes del material, un silicato cálcico

hidratado tipo gel C-S-H. Este gel está formado por cadenas lineales de tetraedros de sílice unidos a una lámina central de CaO. En la Figura 2(b) se presenta de forma muy resumida el proceso de activación alcalina de una ceniza volante, donde el producto final obtenido es un silicoaluminato hidratado: se trata de un precursor ceolítico con estructura tridimensional (Palomo et al., 2003) y consecuentemente mucho más polimerizada que la del gel C-S-H.

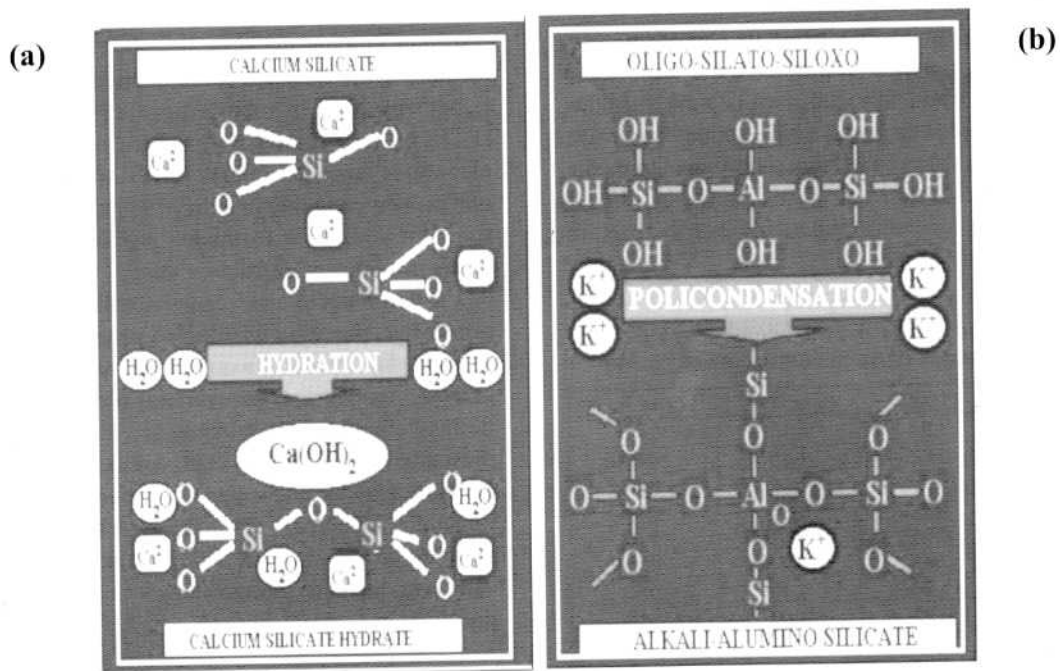


Figura 2. Esquema del proceso de reacción: (a) hidratación del cemento Portland; (b) activación de un silicoaluminato (ceniza volante)

3.1.2 Caracterización de los Productos de Reacción

Como se acaba de indicar en la hidratación del OPC (Cementos Portland) se obtiene gel C-S-H como producto mayoritario y portlandita y etringita como productos minoritarios. En la Figura 3(a) se muestra una imagen general en la que se puede observar la morfología de un mortero de cemento hidratado donde junto al gel C-S-H (punto C), en la zona de interfase árido-matriz se detecta la presencia de un grupo numeroso de cristales de portlandita (punto B). Dichos cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se presentan muy bien definidos con formas planas y hexagonales. Por el gran tamaño de estos y por lo tanto, por su baja superficie específica, las fuerzas de enlace que lo unen a otros sólidos son relativamente débiles.

Ello hace que su contribución a las resistencias mecánicas del cemento u hormigón sea mínima en comparación con la que aporta el gel C-S-H. Por otro lado, un alto contenido de hidróxido cálcico puede tener un efecto adverso en la durabilidad química del hormigón debido a la elevada solubilidad del mismo en medios acuosos.

En la Figura 3(b) se presenta una formación de cristales de etringita en las primeras etapas del proceso de hidratación. Estos cristales crecen en forma de agujas prismáticas. La etringita, en condiciones determinadas (descenso de la concentración de iones SO_4^{2-} ó Ca^{2+} en la fase acuosa de la pasta) se transforma en monosulfoaluminato cálcico que se manifiesta en forma de cristales hexagonales.

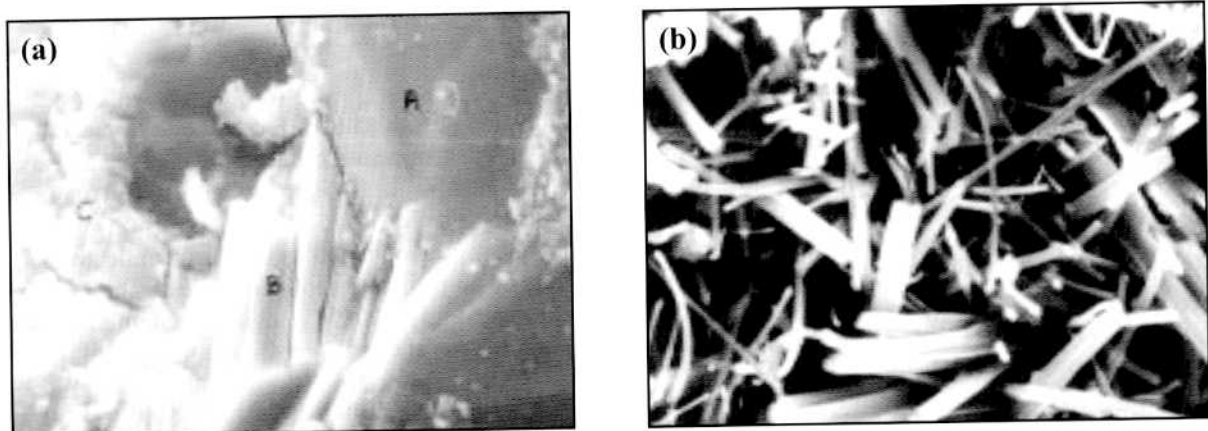


Figura 3. Micrografías de mortero de cemento portland (a) árido (punto A), gel C-S-H (punto C) y cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (punto B); (b) cristales de etringita

En las pastas y morteros de ceniza volante activada alcalinamente, el principal producto de reacción es un silicoaluminato alcalino de naturaleza amorfa (Palomo et al., 2003). En la Figura 4(a) se muestra la morfología que presentan las cenizas al reaccionar con la disolución alcalina. En esta figura se observa una partícula de ceniza volante recubierta por una densa y compacta costra de producto de reacción (punto A) que poco a poco va extendiéndose y dotando de una firme solidez mecánica al sistema. El material que representa el punto C en dicha figura 4 se corresponde con la matriz mayoritaria de la pasta. Finalmente indicar que en la activación alcalina de cenizas volantes no se detecta la formación de portlandita ni de etringita productos de naturaleza cálcica responsables de

algunos de los problemas de durabilidad asociados al hormigón de cemento portland.

En la Figura 4(b) (imagen BSEM) se observa el aspecto que presenta un mortero de ceniza volante activada alcalinamente. Se observa una interfase árido-matriz de escaso grosor, prácticamente inexistente, lo que indica una buena adherencia entre ambos. Este hecho se ha constatado a través de ensayos específicos de adherencia del tipo "pull-out" y por lo tanto se puede afirmar que la excelente unión de este conglomerante con los áridos y con las armaduras metálicas constituye una de sus principales características (Fernández-Jiménez et al., 2003). También se observa como algunas de las esferas de la ceniza presentan en su interior producto de reacción.

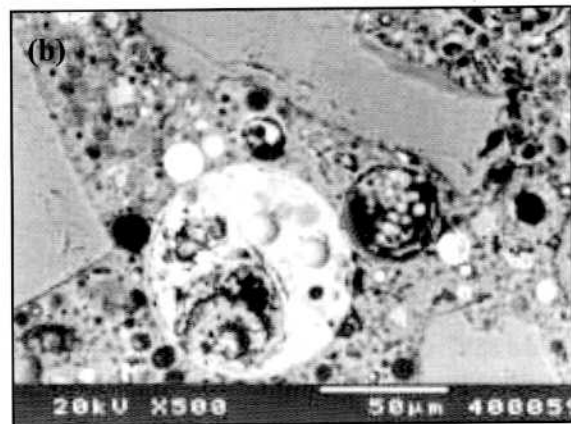
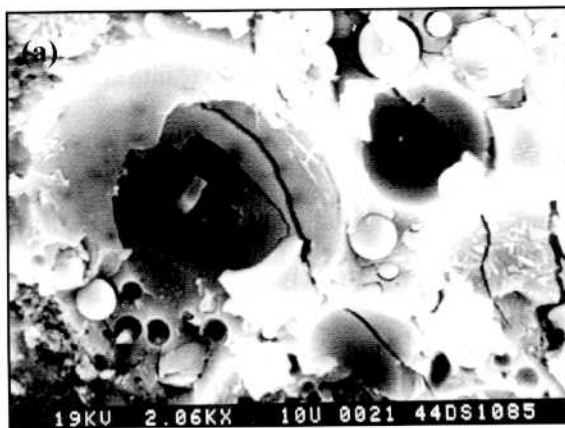


Figura 4. Ceniza volante activada alcalinamente (a) Micrografía MEB (b) micrografía BSEM.

3.2 Caracterización Físico- Mecánica

Físicamente los morteros y hormigones de cemento portland en estado fresco y los morteros y hormigones de cenizas volantes activadas, no presentan grandes diferencias aparentes como puede observarse en la Figura 5. No obstante, existen ciertas variaciones básicas en el concepto de dosificación, tanto en mortero como en hormigón. En el caso del nuevo material se puede trabajar con morteros y hormigones con una mayor dosificación, de ceniza volante (en mortero se han ensayado, con buenos resultados, dosificaciones en peso arena/ceniza 2/1 y en hormigón relaciones

gruesos+finos/ceniza 4/1). Ello se debe en parte a la menor densidad de la ceniza y también a que los morteros y hormigones de ceniza presentan bajo calor de reacción y baja retracción, causas básicas en la limitación de la cantidad de cemento dosificado en morteros y hormigones tradicionales.

En la Figura 6 se muestra una fotografía de sendas probetas de hormigón endurecido de: (a) OPC y (b) de ceniza activada y de lajas de 5cm cortadas en la zona central. Como puede observarse en dicha figura, macroscópicamente hablando apenas se detectan diferencias entre ambos materiales.

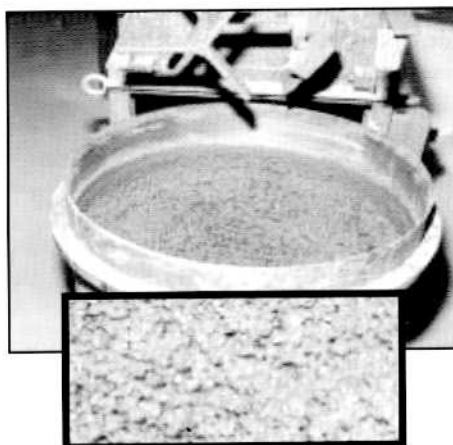


Figura 5. Aspecto físico de un hormigón fresco de (a) OPC (b) ceniza volante activada (exento de cemento Portland)

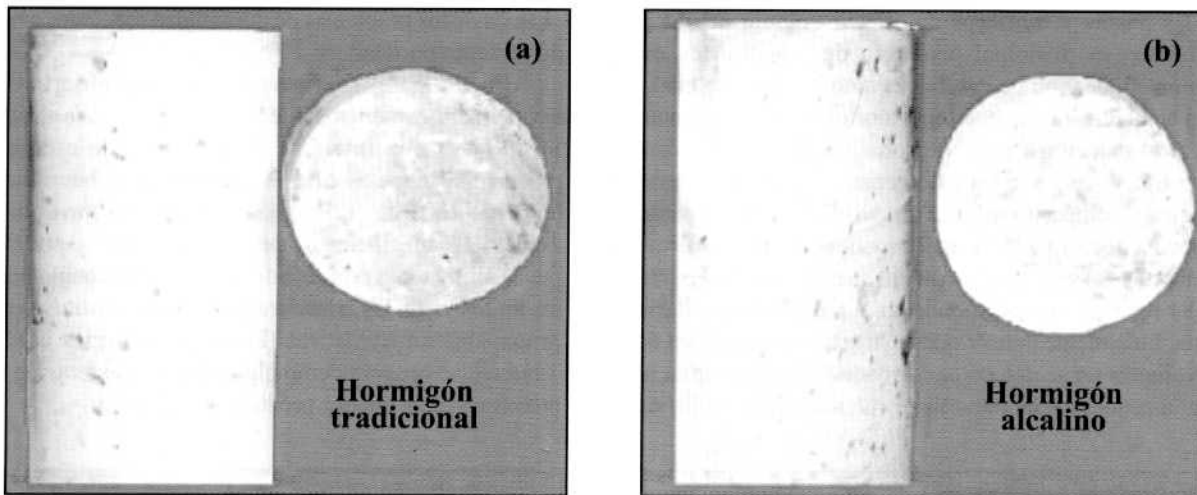


Figura 6. Aspecto físico de probetas cilíndricas de hormigón de: (a) OPC y (b) ceniza volante activada (exento de cemento Portland)

3.2.1 Resistencias Mecánicas a la Compresión

En la Figura 7 se muestran los valores de resistencia a la compresión del mortero de cemento CEM I 42,5 curado térmicamente a 40°C durante 20 horas, junto a las resistencias de los morteros de ceniza activadas alcalinamente y curadas durante 20h a 85°C. Con posterioridad al curado térmico, se observa en dicha figura que los morteros de ceniza presentan un desarrollo resistente muy elevado en el transcurso de unas pocas horas (muy superior al que presenta el mortero de cemento en ese mismo corto espacio de tiempo). La posterior evolución de las resistencias mecánicas con el tiempo mantiene, en todos los casos (incluido el mortero de cemento tradicional), una tendencia de incremento progresivo aunque con relativa lentitud.

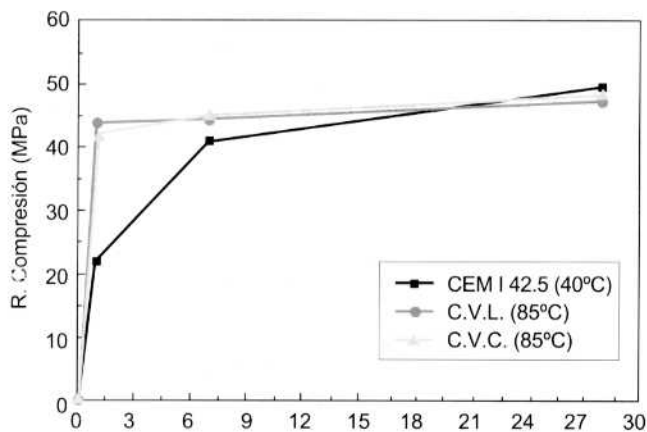


Figura 7. Resistencias a compresión en mortero de cemento y ceniza volante activada alcalinamente, curados térmicamente durante 20 horas

En la Figura 8 se presentan los valores de resistencia a compresión del nuevo material, en probetas de hormigón cilíndricas (15x30 cm), en función de un conjunto de variables que afectan al desarrollo resistente de dichas probetas de forma similar a como estos mismos parámetros lo hacen con el hormigón tradicional de cemento Portland. Dichas variables son: la relación “disolución alcalina/ceniza” (en vez de relación “agua/cemento”); la concentración del activador en el agua de amasado; la temperatura de curado y el tiempo de curado a la temperatura de trabajo.

En cuanto a la relación “disolución activadora ceniza” (Figura 8 a) hay que destacar que al igual que con el hormigón tradicional, las mezclas con menos líquido tienden a generar resistencias mecánicas superiores. De la Figura 8 b se deduce la enorme importancia que tiene en los nuevos hormigones alcalinos, la concentración de activador alcalino incorporado en el agua de amasado y también el tipo de activador: La presencia de sílice soluble en el agua de amasado (procedente del silicato sódico utilizado en la activación alcalina) mejora notablemente el desarrollo de resistencias mecánicas. Finalmente, como era de prever, el tiempo y la temperatura de curado del material afectan de forma positiva a las resistencias mecánicas de manera que a medida que aumentan los valores de dichas variables, la resistencia a la compresión también aumenta (Figuras 8c y 8d).

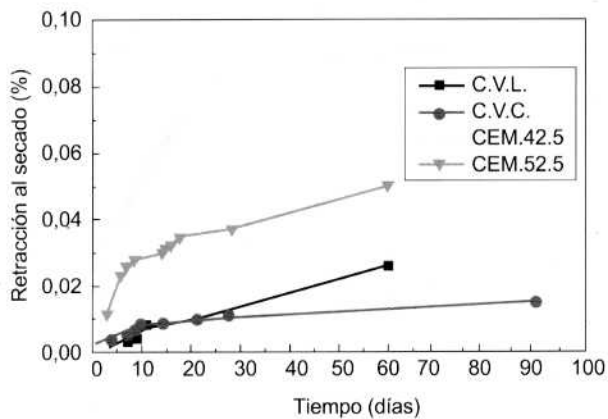


Figura 10. Retracción al secado en morteros de cemento Portland y de ceniza volante activada alcalinamente

4. DURABILIDAD

Es bien conocido que el hormigón es un material que debe garantizar las prestaciones mecánicas previstas en el proyecto de la obra donde se emplee, a partir de las edades deseadas y mantenerlas a lo largo de toda su vida útil en las condiciones ambientales previstas. En definitiva, el hormigón debe ser un material durable.

En el caso de los elementos prefabricados con hormigón tradicional de cemento Portland, sometidos a un proceso térmico de curado acelerado, se conocen algunos problemas específicos de durabilidad que aparecen por el hecho de aplicar calor durante ese periodo de curado y que están relacionados con la formación de una "etringita" tardía o retrasada, expansiva en la matriz cementante (fenómeno DEF (Taylor, 1967; Taylor, 1994; Lawrence, 1995).

En lo que respecta a la durabilidad de los morteros y hormigones de ceniza volante, los datos disponibles son muy escasos debido a la novedad de estos materiales. No obstante, a continuación se expone, de forma resumida, el comportamiento que cabe esperar en estos nuevos materiales frente a los principales problemas de durabilidad que presenta el cemento portland.

Estabilidad en medios ácidos: El principal producto que se forma en la activación alcalina de cenizas volantes es un precursor ceolítico, un silicoaluminato sódico, de carácter más ácido que el gel C-S-H. Por ello su estabilidad en medios ácidos fuertemente agresivos se espera sea superior (Palomo et al., 1999).

Ataque por sulfatos: Con respecto al ataque por sulfatos que puede experimentar el cemento Portland hay que indicar que en el nuevo material obtenido por la activación de compuestos de carácter aluminosilícico, no hay aluminatos cálcicos y por lo tanto la formación de etringita no va a tener lugar.

Carbonatación: El principal problema que se deriva de la carbonatación del cemento Portland es la formación de carbonato cálcico, por reacción del CO₂ con los iones C_a²⁺ de la portlandita, y por lo tanto el descenso del pH de la disolución acuosa que

se encuentra entre los poros del material lo cual da lugar a la despasivación y posterior corrosión de las armaduras. Estudios recientes indican que en el caso de las cenizas volantes activadas alcalinamente, es el tipo de curado el que afecta de forma decisiva a la carbonatación del material. De manera que cuando el curado se lleva a cabo en condiciones de humedad elevada, la carbonatación del sodio remanente en el sistema se produce con extraordinaria lentitud (Criado et al., 2004). Este hecho garantiza un elevado pH de la fase acuosa del hormigón y por lo tanto la pasivación del acero.

5. ASPECTOS ECONOMICOS A CONSIDERAR

Finalmente en lo que respecta a la posible rentabilidad de este nuevo material, hay que considerar que el precio estimado en la fabricación de un m³ de hormigón de ceniza volante activada alcalinamente, estaría comprendido entre el precio de un hormigón de cemento portland de resistencia media y un hormigón de altas resistencias. En la Tabla 2 se dan algunos precios de mercado de los materiales necesarios.

Tabla 2. Precios de la fabricación de m³ de hormigón

H. Cem	Árido 6/12	Arena 0/4	OPC	Aditivo	Agua	Total
Kilos	1073	849	384	6.2	147	2459.2
Precio €/kg.	0.011	0.01	0.08	0.26	0.0	
Precio €	11,803	8,49	30,72	1,612	0.0	52,62 €/m ³

H. Cem	Árido 6/12	Arena 0/4	Ceniza	Disolución	Agua	Total
Kilos	1050	825	465	98.2	55.24	2493
Precio €/kg.	0.011	0.01	0.02	0.28	0.0	
Precio €	11.55	8.25	9.3	27.49	0	56,59 €/m ³

*H. Cem	Árido 6/12	Arena 0/4	Ceniza	Disolución	Agua	Total
Kilos	1073	849	384	6.2	147	2459.2
Precio €/kg.	0.011	0.01	0.10	0.87	0.0	
Precio €	11.803	8.49	38.4	5.39	0.0	64,98 €/m ³

*H. Cem. R.= Hormigón de alta resistencia

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo desean expresar su agradecimiento a la dirección general de investigación científica por financiar este estudio a través del proyecto COO-1999-AX-038 y a la Comunidad de Madrid por la concesión de una beca postdoctoral asociada a estas investigaciones. Así como a J.L. García y a A. Gil por su colaboración en los ensayos mecánicos.

7. REFERENCIAS

- BLANCO-VARELA M. T., PALOMO, A., PUERTAS, F. y VÁZQUEZ, T. (1995), "Influencia de la incorporación conjunta de CaF₂ and CaSO₄ en el proceso de clinkerización. Obtención de nuevos cementos. Materiales de Construcción, Vol 45, nº 239, pp. 21-39.
- BYFORES, K. (1989), "Durability of concrete made with alkali activated slag" 3rd Int. Symp. on Fly Ash, Silica

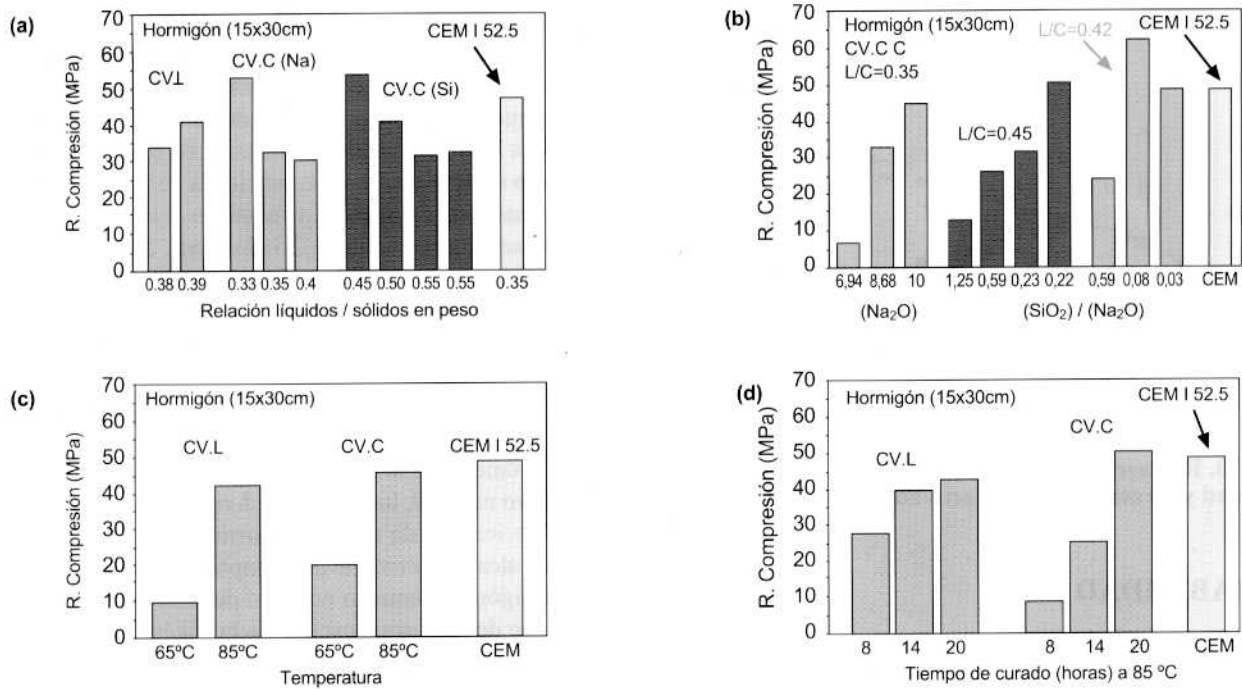


Figura 8. Evolución de las resistencias a compresión de hormigón de ceniza volante activada alcalinamente, en función de: (a) relación "disolución activadora/ceniza"; (b) concentración del activador en el agua de amasado; (c) temperatura de curado y (d) tiempo de curado térmico

3.2.2 Diagramas Tensión-Deformación

En la Figura 9 se representa el gráfico tensión-deformación para el hormigón de cemento CEM I, 52.5, previamente mencionado (a) y el del hormigón de ceniza L (b). En cada gráfico se da el comportamiento de dos probetas junto con el

módulo de elasticidad tangente para el valor medio de las dos.

Según se desprende de los gráficos de la Figura 9, el hormigón de ceniza activada exento de cemento Portland, posee un módulo de elasticidad ligeramente inferior al hormigón de cemento Portland.

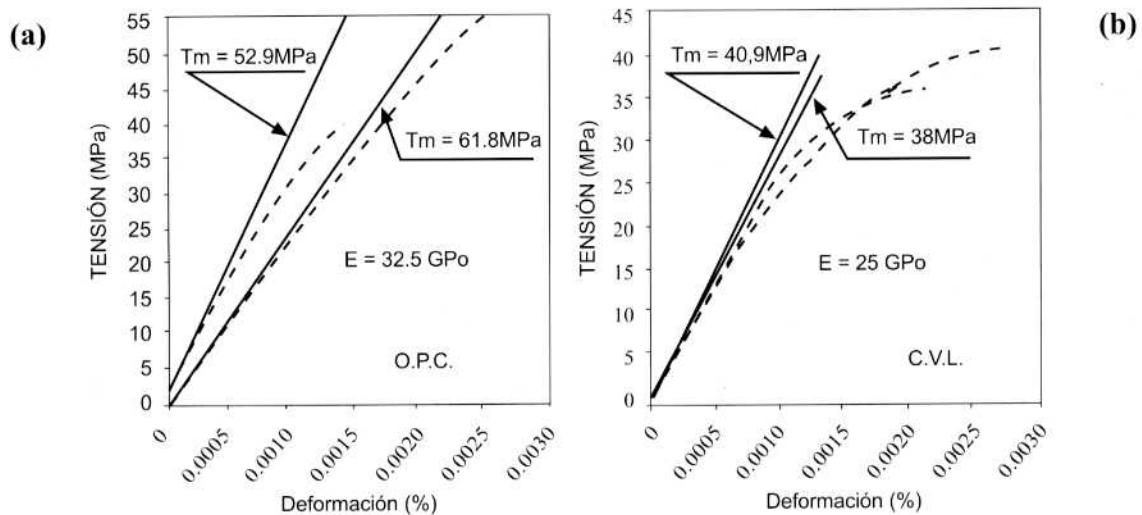


Figura 9. Módulo de elasticidad: (a) hormigón de Cemento tipo I, 52.5; (b) hormigón de ceniza volante L activada alcalinamente

3.2.3 Estabilidad de Volumen

En general, cuando un material es sometido a unas determinadas condiciones ambientales, éste pierde agua y se contrae. Como se observa en la Figura 10, los morteros de

ceniza activada alcalinamente experimentan una retracción al secado muy pequeña; claramente inferior a la que presentan los morteros de cemento.

- Fume, Slag and Natural Pozzolanas in Concrete. Trondheim. SP114-70, pp.1547-1563.
- CEMBUREAU website (2002)
- CRiado, M., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. y PALOMO, A. (2004), "Activación alcalina de cenizas volantes. Efecto del curado sobre el producto final".
- DAVIDOVITS, J. (1991), "Geopolymers: Inorganic polymeric new materials" J. Thermal Anal. 37, pp.1633-1656.
- DAVIDOVITS, J. (1994), "Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement". J. Mat. Education Vol 16, pp.91-139.
- FERNANDEZ-JIMENEZ, A. y PUERTAS, F. (1997), "Influencia de la concentración del activador sobre la cinética del proceso de activación de una escoria de alto horno", Mater. Construcc. 246, pp.31-41.
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. y PALOMO, A. (2002), "Empleo de nuevos materiales en prefabricación: hormigones de ceniza volante" IER Congreso Nacional de Prefabricados, Madrid, 22-24 Mayo 2002
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. y PALOMO, A. (2003), "Alkali-activated fly ashes: properties and characteristics". 11th International Congress on the Chemistry of Cement Durban, South Africa.
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A. y PALOMO A. (2003), "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements". Fuel, 82, pp 2259-2265.
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A., y PALOMO A. (2003), "Activating fly ashes: Enlarging the concept of cementitious material". International Symposia. "Celebrating Concrete: People and Practice" Dundee (2003).
- GLUKHOVSKY, V.D. (1965), "Soil silicates. Their properties, technology and manufacturing and fields of application". Doct Tech Sc. Degreee Thesis. Civil Engineering Institute. Kiev.
- GLUKHOVSKY, V.D., ROSTOVSKAJA, G.S. y RUMYNA, G.V. (1980), "High strength slag-alkaline cements". 7th International Congress on the Chemistry of CEMENT. PARIS. 3, V-164-168.
- KUTTI, T. (1992), "Hydration products of alkali activated slags" 9th Int. Cong. on the Chemistry of Cement. New Delhi. Vol. 4, pp.468-474.
- LAWRENCE, C.D. (1995), "Delayed Ettringite Formation: An Issue?", in Materials Science of Concrete IV (J.Skalny & S.Mindess, Eds.), The American Ceramic Society, Westerville, OH, pp.113-154.
- MALEK, R.I.A. y ROY, D.M. (1995), "Structure and properties of alkaline activated cementitious materials" 97th annual meeting of the American Ceramic Society. Cincinnati, OH.
- PALOMO, A., BLANCO-VALERA, M.T., GRANIZO, M.L., PUERTAS, F., VÁZQUEZ, T. y GRUTZECK, M.W. (1999), "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin" Cement and Concrete. Research, Vol. 29, pp.997-1004.
- PALOMO, A. y GLASSER, F.P. (1992), "Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin". British Ceramic Transactions. Vol.91. pp.107-112.
- PALOMO, A., GRUTZECK, M.W. y BLANCO, M.T. (1999), "Alkali-activated fly ashes a cement for the future" Cement and Concrete Research, Vol 29, pp.1323-1329.
- PALOMO, A., ALONSO S., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A., SOBRADOS, I. y SANZ, J. (2003), Alkaline activation of fly ashes. A NMR study of the reaction products. J. Am. Ceramic. Soc. (Submitted for publication).
- PUERTAS, F., AMAT, T., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. y VÁZQUEZ, T. (2002), Alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. Mechanical and durable behaviour" International Symposium Non-Traditional Cement and Concrete, Brno, Czech Republic, June, 11-13.
- PUERTAS, F., DE GUTIERREZ, R., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., y DELVASTO, S. (2002), "Alkaline cement mortars. Chemical resistance to sulphate and seawater attack" Materiales de Construcción, Vol 52, nº267, pp.55-71.
- SILVERSTRIM, T. y MARTIN, J. (1999), "Geopolymeric fly ash cement" Proc. Of the 2nd Int. Conf. Geoloymere 99. Saint Quentin. pp.107-108.
- TAILING, B. y BRANDSTER, J. (1989), "Present state and future of alkali-activated slag concretes" 3rd International Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Tondheim. SP 114-74, pp.1519-1546.
- TAYLOR, H.F.W. (1967), "The Chemistry of Cement" Ed. Urmo
- TAYLOR, H.F.W. (1994), "Delayed Ettringite Formation", in Advances in Cement and Concrete (M.W. Grutzeck & S.L. Sarkar, Eds.), American Society of Civil Engineers, 1994; see also: "Sulfate Reactions - Microstructural and Chemical Aspects", in Cement Technology, Ceramic Transactions 40, pp.61-78.
- TEOREANU, I. (1991), "The interaction mechanism of blast furnace slags with water. The role of the activating agents". II Cemento, Nº2, pp.91-97.
- VAN DEVENTER, y HUA XU (2000), "The geopolymerisation of alumino-silicate minerals" Int. J. Miner. Process, 59, pp.247-266.
- WANG, S.D. y SCRIVENER, K.L. (1995), "Hydration products of alkali activated slag cement". Cement and Concrete Research, 25 (3), pp.561-571.
- ZHAOHUI, X. y YUNPING, X. (2001), "Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash". Cem. and Concr. Res. Vol. 31, pp.1245-1249.

Ana María Fernández-Jiménez

*Instituto de Ciencias de la Construcción
Eduardo Torroja (CSIC), Madrid, España*

Angel Palomo

*Instituto de Ciencias de la Construcción
Eduardo Torroja (CSIC), Madrid, España*

Cecilio López

*Instituto de Ciencias de la Construcción
Eduardo Torroja (CSIC), Madrid, España*
